

Simulación de molienda de maíz bajo el método de elementos discretos

Chiaravalle, A.G.^{1,2}, Cotabarren, I.M.^{1,2}, Piña, J.^{1,2}

¹ Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI, UNS-CONICET), Camino La Carrindanga Km 7, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

² Departamento de Ingeniería Química (DIQ), Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
achiaravalle@plapiqui.edu.ar

Resumen. En el presente trabajo se abordó la simulación del proceso de molienda de maíz en continuo bajo el método de elementos discretos (*discrete element method*, DEM), utilizando el software Rocky DEM (ANSYS) y el modelo de rotura por reemplazo de partículas de Tavares. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en un molino de martillos a escala de laboratorio con mallas intercambia-bles. Se estudiaron tres mallas de diferente apertura bajo tres caudales de maíz cada una. Se midió el consumo de potencia y se determinó la distribución de tamaño de partículas (PSD) del producto para cada configuración ensayada. Los parámetros del modelo de rotura se determinaron experimentalmente mediante ensayos de compresión controlada y diferentes tipos de ensayos de impacto *ad hoc*. Se realizó un análisis de sensibilidad en DEM, simulando uno de los casos de molienda con diferentes valores para los parámetros que no pudieron medirse experimentalmente, con el objetivo de determinar cuáles afectaban más a los resultados y calibrar sus valores. Finalmente, se simuló cada configuración experimental, logrando predecir un consumo de potencia y PSD de producto adecuadas, registrando las diferencias observadas entre los casos experimentales.

Palabras clave: Método de elementos discretos, Maíz, Molienda, Simulación

1 Introducción

En la elaboración de productos alimenticios, la molienda es una operación unitaria fundamental. La reducción de tamaño de partículas mejora el rendimiento de los ingredientes en la mezcla, así como su valor nutritivo [1]. El maíz molido es la materia prima más comúnmente utilizada en la producción de alimentos balanceados, dado su uniforme valor nutritivo y la estructura que proporciona al producto final [2]. Los molinos de martillo son frecuentemente utilizados en la industria alimentaria debido a su versatilidad y fácil operación, así como su bajo coste de mantenimiento [3].

A pesar de su importancia, en la actualidad existe una vacancia de modelos que describan adecuadamente los fenómenos de fragmentación. Por ende, la molienda suele

ser ineficiente energéticamente, y resulta difícil predecir la distribución de tamaño de partículas (*particle size distribution*, PSD) que se alcanzará.

El método de elementos discretos (*discrete element method*, DEM) es una herramienta de modelado para analizar el comportamiento de sistemas de partículas. Dada su naturaleza numérica, presenta la ventaja de acceder a los datos en cualquier etapa de una simulación, produciendo resultados detallados mucho más allá de los modelos empíricos o macroscópicos [4] tradicionalmente utilizados.

El modelado de procesos de fragmentación es una de las capacidades más sofisticadas de DEM. Las simulaciones de rotura implican cuantificar los mecanismos de fractura, mediante la calibración de parámetros, y a su vez gestionar el coste computacional del incremento en el número de partículas a medida que aparecen los fragmentos [5]. Existen dos enfoques para modelar la rotura en DEM, los "modelos de partículas unidas", que representan partículas originales como enlaces de subpartículas, y los "modelos de reemplazo de partículas", que sustituyen cada partícula por fragmentos de la misma masa y volumen, en cuanto se cumplen las condiciones de rotura. Los modelos de partículas unidas han sido estudiados por un mayor número de autores que los modelos de reemplazo de partículas, de modo que estos últimos deben ser abordados con mayor énfasis para un mejor aprovechamiento de sus capacidades y potencial.

Diversos autores han abordado el proceso de molienda de diferentes materiales bajo diversos enfoques en DEM. Patwa *et al.* [6] modelaron la molienda de trigo en un molino de rodillos mediante un enfoque de partículas unidas, calibrando el modelo en comparación con resultados experimentales. André y Tavares [7] desarrollaron un modelo para una trituradora de cono a escala de laboratorio, operando con muestras de piedra caliza, granulita y mineral de cobre, permitiendo predecir su comportamiento satisfactoriamente. Doroszuk y Król [8] modelaron un molino de martillos a escala industrial para cobre de diferentes composiciones litológicas. Xia *et al.* [9] estudiaron el comportamiento de tallos de maíz en un molino de cuchillos, evaluando las diferentes configuraciones operativas posibles en DEM. Guo *et al.* [10] simularon la molienda de minerales para un molino giratorio, con el objetivo de incrementar la productividad.

En el presente trabajo, se aborda la molienda de maíz en continuo en un molino de martillos de escala laboratorio, modelándola bajo DEM para validar su capacidad de predecir el comportamiento de este material, mediante un modelo de reemplazo de partículas. Las simulaciones fueron realizadas en el software Rocky DEM (Ansys) versión 2023R1, en una estación de trabajo de 32 GB de RAM, utilizando un procesador Intel® Core™ i7-10700 a 2.90GHz.

2 Modelos matemáticos

2.1 Método de elementos discretos

DEM discretiza las partículas de forma individual, monitoreando las interacciones contacto por contacto y modelando el movimiento partícula por partícula [11]. La implementación de DEM se basa en la correcta selección de los modelos de contacto y la calibración de las propiedades y parámetros del material particulado [12]. Para más

información sobre los fundamentos y ecuaciones de DEM, consultar el manual técnico de Ansys Rocky (2024) [13].

2.2 Modelo de rotura de Tavares

El modelo de rotura de Tavares fue empleado en este trabajo para la simulación de molienda del maíz. Es un modelo de reemplazo de partículas, en el cual la fractura se cuantifica en cuanto una partícula se ve sometida a un contacto de energía mayor que su energía de fractura específica. El modelo es idealmente capaz de representar cualquier material mediante el ajuste correcto de sus parámetros. Ha sido verificado y validado con gran detalle para varios materiales [14–16] y utilizado para la simulación de equipos completos [7,15,17]. Una descripción detallada de los fundamentos del modelo y la deducción de sus ecuaciones, es dada por Tavares y colaboradores en una serie de publicaciones, siendo referidos en este trabajo los aspectos más relevantes [18–21].

Específicamente, a cada partícula que ingresa a la simulación se le asigna un valor de energía específica E , en unidades de energía/masa. La probabilidad de rotura P_0 en un evento de contacto está dada por:

$$P_0(E) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E^* - \ln E_{50}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (1)$$

$$E^* = \frac{E_{max} E}{E_{max} - E} \quad (2)$$

donde E_{50} , σ^2 y E_{max} son la mediana, varianza y valor superior de truncado de la distribución de energías de rotura, respectivamente. Dicha distribución se obtiene de ensayos de compresión controlada o de impacto, en los que se determina la energía necesaria para llegar a la rotura de diferentes muestras del material [21,22].

Es sabido que la energía que requiere una partícula para fragmentarse se incrementa a medida que el tamaño de partícula d se reduce. A partir del valor de E_{50} , este efecto se puede cuantificar como:

$$E_{50} = E_{\infty} \left[1 + \left(\frac{d_0}{d} \right)^{\varphi} \right] \quad (3)$$

donde E_{∞} , d_0 y φ son parámetros del modelo que deben ajustarse experimentalmente para diferentes valores de d . Para aquellos materiales cuya distribución de tamaños sea monodispersa, como es el caso del maíz, dos de los tres parámetros de la ecuación (3) deben fijarse en sus valores por defecto, y ajustar el tercero [22].

La particularidad del modelo de Tavares es su capacidad de cuantificar el daño acumulado en las partículas tras sucesivos eventos en los cuales no ocurre rotura. La energía se reduce en función del daño de cada evento de impacto n , según:

$$E_n = E_{n-1}(1 - D_n) \quad (4)$$

$$D_n = \left[\frac{2\gamma}{(2\gamma - 5D_n + 5)} \frac{E_{k,n}}{E_{n-1}} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (5)$$

donde E_{n-1} y E_n son la energía de la partícula antes y después de la colisión, D_n es el daño recibido en dicha colisión, que se calcula iterativamente en cada evento mediante la ecuación (5), $E_{k,n}$ es la energía de impacto que recibe la partícula, y γ es el coeficiente de acumulación de daño, que debe calibrarse en función de ensayos de impactos sucesivos sobre el material [20].

Cuando la partícula es sometida a un contacto cuya energía $E_{k,n}$ es superior a E_{n-1} , ocurre la rotura. $E_{k,n}$ se denota como $E_{k,b}$. Los fragmentos se generan en relación al valor del t_{10} , que se calcula como el porcentaje en masa de fragmentos que poseen un tamaño menor a 1/10 del tamaño original de la partícula:

$$t_{10} = A \left[1 - \exp\left(-\frac{b'E_{k,b}}{E_b}\right) \right] \quad (6)$$

donde A y b' son parámetros que deben ajustarse experimentalmente, y E_b es una medida de la energía de impacto específica de las partículas, la cual debe establecerse como un parámetro en Rocky DEM. La PSD completa se expresa mediante la función Beta Incompleta [23], dada por:

$$t_n(t_{10}) = \frac{100}{\int_0^1 x^{\alpha_n-1}(1-x)^{\beta_n-1} dx} \int_0^{t_{10}/100} x^{\alpha_n-1}(1-x)^{\beta_n-1} dx \quad (7)$$

donde cada t_n representa el porcentaje de fragmentos de tamaño menor a 1/n de la partícula original. α_n y β_n son parámetros que deben ajustarse junto con A y b' mediante ensayos de impacto a diferentes energías, determinando la PSD generada en cada caso, como es el caso de los ensayos de impacto [21,22]. Para la generación de fragmentos, el modelo en Rocky DEM requiere a su vez de la calibración del mínimo tamaño absoluto admisible para los fragmentos (d_{min}).

3 Materiales y Métodos

3.1 Molienda experimental

El maíz fue proporcionado por la empresa de producción de alimentos para animales ALIBA S.A. (Bahía Blanca, Argentina). Los ensayos de molienda se llevaron a cabo en un molino de martillos de escala laboratorio (Perkin Elmer, Perten 120). El equipo cuenta con una cámara cilíndrica con tres aspas girando en su interior a una velocidad fija de 10.000 rpm, con dos martillos cada una en su extremo. La alimentación es realizada por el tope de la cámara mediante un tornillo sinfín con velocidad variable, el cual permite regular el caudal continuo de maíz. En el fondo de la cámara se colocan mallas intercambiables con diferente apertura de orificios, definiendo así el límite superior de la PSD.

Se estudió la molienda utilizando tres mallas (1, 2 y 4 mm de apertura) ensayadas contra tres caudales de alimentación cada una (100, 200 y 400 g/min). Cada configuración fue ensayada dos veces. Se registró el consumo de potencia del equipo mediante un potenciómetro desarrollado *ad hoc*. Cada prueba fue llevada a cabo por 3 minutos, de modo de comparar el consumo de energía en la misma ventana de tiempo.

El producto de cada ensayo fue recolectado y tamizado por triplicado. Se empleó una torre de once tamices ASTM, con una progresión geométrica de $1/\sqrt{2}$, desde el tamiz ASTM N°8 (2380 μm) hasta el tamiz ASTM N°200 (74 μm).

3.2 Calibración del modelo de rotura

El modelo de rotura debe calibrarse en función de ensayos que permitan determinar la distribución de energías necesaria para fracturar el material, y la PSD de fragmentos para diferentes energías de impacto aplicadas sobre el material. Para este trabajo, se llevaron a cabo dos tipos de ensayos de rotura diferentes sobre los granos de maíz, siguiendo las recomendaciones de la literatura [20–22].

Compresión controlada

Para determinar la distribución de energía específica de rotura, se empleó un texturómetro (TA Plus Lloyd Instruments, Inglaterra). Este equipo registra el perfil de tensión-deformación que experimenta una muestra de material, sometida a compresión a velocidad constante. Un total de 60 granos de maíz fueron sometidos a compresión con una celda cilíndrica de 500 N, a una velocidad de 1 cm/min. El punto en el cual ocurrió la rotura fue determinado como una caída abrupta en la pendiente de los perfiles tensión-deformación. La energía específica de rotura fue calculada integrando el área debajo de dicha curva, y dividiendo el valor obtenido por la masa de cada grano.

La información obtenida de estos ensayos permitió calibrar las ecuaciones (1), (2) y (3). Debido a que el maíz es monodisperso en tamaño, para la ecuación (3) se definió al tamaño d como la mayor dimensión de los granos aproximados como paralelepípedos en DEM, según recomendación de la bibliografía. Esta resultó ser la diagonal de una de las caras, de 16,80 cm [24].

Ensayos de impacto simple

Para calibrar la PSD de fragmentos del maíz, se realizaron ensayos de impacto simple sobre cúmulos de granos de maíz. Se fabricó un impactador *ad hoc* que consiste en una pesa suspendida con un electroimán, fijado a una barra metálica transversal, que puede colocarse a altura variable. Se colocó una placa metálica a una determinada altura de la pesa suspendida. Sobre ésta, se colocaron los granos de maíz al ser impactados. La energía específica de impacto se calculó como la masa de la pesa multiplicada por la altura hasta la placa, dividido la masa de granos de maíz. Se consideró que toda la energía potencial fue absorbida por los granos como energía cinética.

Se utilizó un recipiente metálico de 4,20 kg como pesa suspendida, dentro del cual se introdujo una pesa adicional de 5,26 kg en algunos casos para aumentar la masa total de impacto. La masa de granos de maíz utilizada varió entre 15 y 10 g para los diferentes

casos estudiados (50 y 35 granos aproximadamente, respectivamente). Se fijaron diferentes alturas entre la pesa y la base metálica para cada caso, determinando seis niveles de energía: 0,14, 0,60, 0,82, 1,24, 1,67 y 2,06 kWh/t.

Se realizaron nueve o quince impactos por configuración, dependiendo de la masa de granos empleada. Los fragmentos generados se caracterizaron por tamizado (tamices con progresión geométrica de $1/\sqrt{2}$, desde el tamiz ASTM N°4 (4760 μm) hasta el tamiz ASTM N°200 (74 μm)).

En función de las PSD obtenidas, se registró el valor t_{10} promedio para cada nivel de energía, y se ajustaron los parámetros de la ecuación (6). Para ello, se estableció el tamaño inicial del maíz en 7,14 mm, valor intermedio entre los tamices utilizados para medir su tamaño original. A su vez, se determinaron los t_n óptimos para representar adecuadamente las PSD según el modelo de Tavares en Rocky DEM. Se graficaron los t_n elegidos en función del t_{10} , de modo de ajustar los α_n y β_n de la ecuación (7).

3.3 Implementación en DEM

Representación del material

El código DEM requiere la correcta determinación de las propiedades y parámetros de interacción de los materiales, para resolver los contactos y predecir el comportamiento de las partículas. A su vez, las partículas deben ser modeladas de formas más sencillas que los granos irregulares reales, de modo de reducir el coste computacional. Las propiedades y parámetros de interacción del maíz, así como su aproximación a una forma poliédrica para su simulación, fueron determinadas mediante un enfoque combinado de calibración experimental-DEM por los autores en un trabajo previo [24].

Configuración de las simulaciones

Para la implementación de la molienda en DEM, se dibujaron las piezas del molino en CAD 3d. Se utilizó dicho software para calcular la masa de las piezas, utilizando la densidad del acero extraída de bibliografía. Al momento de correr las simulaciones, se asignó la velocidad de rotación correspondiente a las aspas y se estableció la entrada de partículas por el tope del sistema. En la **Fig. 1** se muestra el molino escala laboratorio junto al molino implementado en Rocky DEM.

Se decidió simular la molienda durante 3,5 segundos, generando partículas al caudal correspondiente durante los primeros 2 segundos de operación y tomando una ventana de tiempo razonable. Se configuró el sistema de modo que, al salir por el fondo de la cámara de molienda, los fragmentos atravesasen un volumen de control fijo para ser cuantificados y determinar su PSD, y que luego desapareciesen de la simulación. De este modo, se redujo el coste computacional en un 70%.

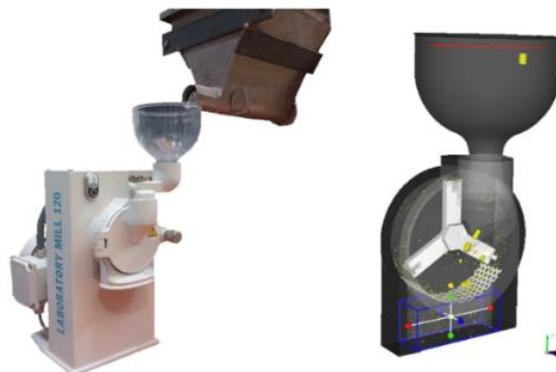


Fig. 1. Izquierda: molino de martillos de escala laboratorio, junto al tornillo alimentador. Derecha: molino implementado en Rocky DEM, denotando el volumen de control a la salida de la cámara de molienda.

3.4 Calibración de parámetros en DEM

Previa simulación de los diferentes casos de molienda, se llevaron a cabo una serie de simulaciones en DEM con el objetivo de estudiar el efecto de la variación de los parámetros de rotura y del material.

Se determinó el punto a partir del cual se llegaba al estado estacionario en las simulaciones, analizando la variación temporal de la PSD de fragmentos a la salida de la cámara de molienda. Se determinó que los 2 segundos de operación elegidos eran suficiente tiempo para alcanzar la condición de estado estacionario.

Se realizaron sucesivas simulaciones cambiando el valor del d_{min} y del módulo de Young (Y) del maíz, parámetro que cuantifica la tensión-deformación elástica de los materiales, de modo de analizar el comportamiento de la PSD y potencia predichas en función de estos dos parámetros. El d_{min} determina el mínimo tamaño admisible para los fragmentos en DEM, estableciendo el límite inferior de la PSD de fragmentos que se generará, y el Y es un parámetro esencial en la simulación de fuerzas de contacto.

3.5 Molienda en el entorno de DEM

Una vez que se determinaron correctamente todos los parámetros, se procedió a la simulación de todos los casos ensayados en Rocky DEM. Se registró la PSD y potencia predichas en cada configuración y se las comparó con los resultados experimentales, a fin de validar el modelo. Se registró a su vez el tiempo de simulación en función del número de fragmentos generado.

4 Resultados

4.1 Ensayos experimentales

A continuación, se presentan los resultados de todas las configuraciones de malla-caudal de alimentación ensayadas en el molino, a excepción de la malla 1 mm – caudal 400 g/min. Al aplicar dicha configuración, la elevada carga de material dentro del molino imposibilitó la operación. De este modo, se la estableció como un límite operacional que debe evitarse a futuro.

Consumo de potencia

En la **Fig. 2** se registra el consumo de potencia promedio en operación para cada configuración experimental. A estos valores se ha restado el consumo de potencia que registra el equipo al estar encendido con la cámara vacía, de aproximadamente 550 W. Las barras de error reflejan la desviación entre la potencia consumida en cada una de las dos réplicas por configuración ensayada.

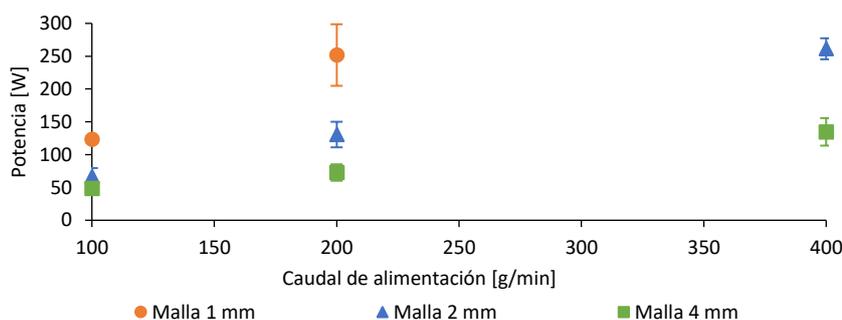


Fig. 2. Potencia de operación promedio para cada configuración experimental.

Se observa un notorio incremento en el consumo de potencia con el aumento de caudal de alimentación para cada malla empleada, como es esperable. Las mallas de apertura más pequeña presentan una tendencia de crecimiento mayor; el equipo consume un 50% más de potencia cuando el caudal se incrementa de 100 g/min a 200 g/min, mientras se usa la malla de 4 mm. Para las mallas de 2 mm y 1 mm, el incremento en el consumo de potencia es del 95% y 103% respectivamente, para el mismo incremento de caudal. El mayor tiempo de residencia del material dentro de la cámara de molienda cuando la apertura de malla es más pequeña se relaciona directamente con un mayor consumo de potencia, para moler el material a tamaños más pequeños.

PSD de fragmentos

En la **Fig. 3** se presentan las PSD para cada configuración de malla – caudal, teniendo en cuenta todas las réplicas realizadas.

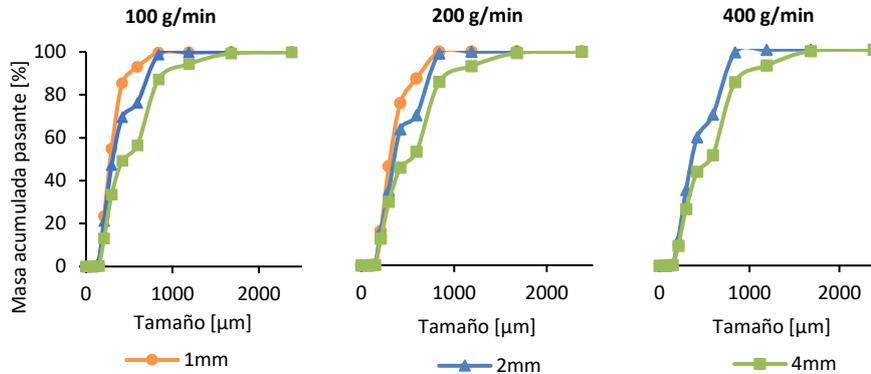


Fig. 3. PSD de fragmentos obtenida para las configuraciones de molienda experimental.

A medida que se incrementa la apertura de malla para el mismo caudal de alimentación, la PSD se corre a tamaños de fragmentos mayores. Esto es esperable ya que las partículas abandonan la cámara más rápidamente al aumentar su probabilidad de atravesar la malla inferior, reduciendo el tiempo de residencia en la cámara de molienda. El proceso de molienda es capaz de generar una población en la que el 75% de los fragmentos posea un tamaño menor al 10% del tamaño original del maíz, para la malla más grande ensayada.

Al igual que otros autores [1,25], se evidencia una distribución bimodal. La inflexión en la curva se encuentra a valores menores de porcentaje acumulado de masa a medida que la apertura de malla se incrementa. A su vez, para caudales mayores a tamaño de malla constante, el corrimiento de la PSD a tamaños mayores es notoriamente menor. Esto sugiere que el mayor tiempo de residencia inducido por el menor tamaño de apertura es el factor más significativo en el resultado de la molienda.

4.2 Ajuste de parámetros del modelo

En las **Tabla 1** y **Tabla 2** se reportan los valores obtenidos para el modelo de rotura de Tavares implementado en DEM, además del módulo de Young del maíz (Y), y los valores hallados para la función Beta incompleta, respectivamente. En la **Fig. 4** se presentan las PSD obtenidas en los ensayos de impacto a diferentes niveles de energía específica.

Tabla 1. Parámetros del modelo de Tavares y del modelo DEM.

σ^2 [-] ^(*)	0.0566	E_{max} [kWh/t]	1,118	E_{∞} [kWh/t] ^(*)	0,011
Y [MPa]	500	d_{min} [µm]	149	ϕ [-] ^(*)	0.45
E_{max}/E_{50} ^(*)	10	A [%]	65	d_0 [mm] ^(*)	400
γ [-]	5	b' [-]	0.085		

(*) Valores extraídos de [24].

Tabla 2. Valores calibrados para la función Beta incompleta.

t_n	1,2	1,5	2	2,5	3	5	15
α_n	0,35	0,9	1,15	1,3	1,15	1,15	1
β_n	50	65	25	18	10	4	0,8

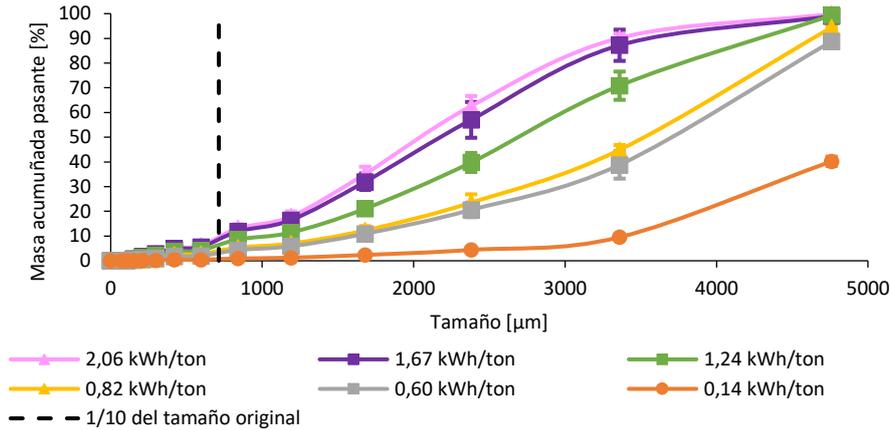


Fig. 4. Resultados de los ensayos de impacto simple.

El valor óptimo para el módulo de Young fue de 500 MPa, el cual coincide con las recomendaciones para operaciones de molienda en DEM. La potencia predicha por el software para valores de un orden de magnitud menor resultó muy imprecisa. Por su parte, incrementarlo a un orden de magnitud mayor no produjo cambios en la predicción de la potencia. La PSD simulada, por su parte, se corre a tamaños menores a medida que disminuye el valor de este parámetro, de modo que encontrar el valor óptimo resultó de un proceso de análisis de sensibilidad por comparación con las PSD experimentales.

El d_{min} final empleado fue igual al valor de apertura del último tamiz que registró retenido significativo de masa en los ensayos experimentales. Es común que las simulaciones de DEM no reflejen la generación de fragmentos muy finos cuando representan un porcentaje muy pequeño de la totalidad de la masa, como es el caso de los fragmentos menores a 149 µm en la molienda de maíz de este trabajo, por lo que se los obvia de las simulaciones para evitar incrementar el coste computacional. Mayores valores para el d_{min} condujeron a predicciones de PSD muy imprecisas, así como también en el consumo de potencia.

En la **Fig. 4** se observan los resultados de los ensayos de impacto simple. A medida que la energía se incrementa, la PSD va tomando la forma característica de ensayos de molienda, en los que la fuerza de impacto es mucho mayor a la aplicada en este ensayo en particular. Se observa el comportamiento bimodal característico del maíz, con la discontinuidad apareciendo a valores mayores de porcentaje acumulado de masa a medida que se incrementa la energía. Los fragmentos generados son de tamaños mucho mayores a la molienda; el retenido porcentual para tamaños menores al 10% no supera

el 8% del total de la masa en ningún caso. Debido a ello, se eligieron valores de t_n que reflejasen estos tamaños adecuadamente. La calibración de los α_n y β_n , así como de A y b' , fue realizada a partir de los valores de t_{10} , siguiendo el procedimiento explicado en la literatura [21,22], hasta encontrar un set de valores que describiese el comportamiento experimental con un mínimo margen de error. Las simulaciones de ajuste de dichos parámetros determinaron que el modelo es mucho menos sensible a éstos que al módulo de Young o el d_{min} .

Por su parte, el valor de γ se mantuvo en su valor por defecto igual a 5, según recomendación de la literatura para materiales con una dureza pobre en comparación con los materiales minerales [20,21].

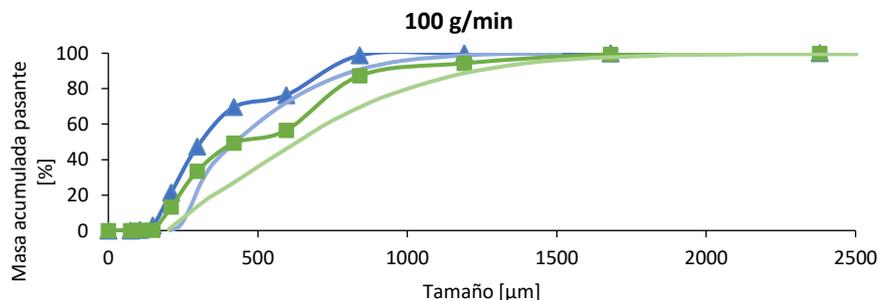
4.3 Simulaciones de molienda

Una vez ajustados todos los parámetros del modelo, se procedió a simular la molienda de los casos experimentales, en el entorno de DEM. En la **Tabla 3** se presenta la potencia consumida por cada molienda DEM y la de sus respectivos casos experimentales. En la **Figura 5** se presenta la PSD obtenida para cada molienda DEM comparándola con las PSD experimentales.

Es importante destacar que, debido al elevado tiempo de simulación, no fue posible llevar a cabo las simulaciones con la malla de 1 mm. Para evaluar la replicabilidad de los resultados en DEM, en una primera instancia se realizaron tres réplicas de la simulación de molienda 4 mm – 200 g/min, registrando variaciones insignificantes entre las mismas, y garantizando así la confiabilidad de los resultados del simulador. Posteriormente, y teniendo en cuenta dicha observación, se llevó a cabo una única molienda DEM por cada configuración experimental ensayada, como resultado final.

Tabla 3. Potencia experimental y simulada promedio para cada configuración.

Malla	Potencia experimental promedio [W]			Potencia DEM promedio [W]		
	100 g/min	200 g/min	400 g/min	100 g/min	200 g/min	400 g/min
2 mm	66,89	130,63	261,3	35,61	51,22	78,59
4 mm	48,59	72,73	134,73	26,92	34,54	58,59



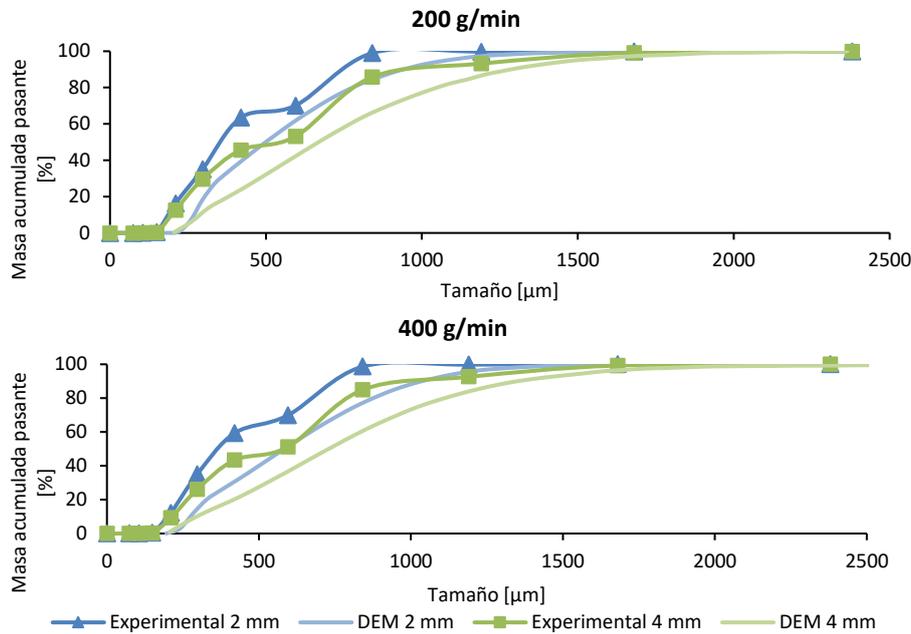


Figura 5. Comparación de las PSD experimentales y simuladas.

La potencia predicha en DEM es un 45% menor a la experimental para las moliendas al menor caudal para ambas mallas. A medida que se incrementa el caudal, la diferencia se acentúa mayormente para la malla de 2 mm en comparación con la malla de 4 mm. Las diferencias registradas se deben a que el modelo no contempla el consumo de energía perdido por fricción, calentamiento del motor, ruido, y demás contingencias que ocurren en la operación real, como explican André y Tavares [7]. La diferencia es esperable y cuantificable. Las PSD predichas por el modelo se encuentran ligeramente corridas hacia tamaños mayores. No logró replicarse la forma bimodal de la PSD experimental, debido a que el modelo de Tavares trabaja con ecuaciones que predicen distribuciones log-normales [21]. No obstante, del mismo modo que en los ensayos experimentales, DEM predice que la mayor influencia en la forma de la PSD está dada por la malla utilizada, por encima del efecto del caudal operativo.

5 Conclusiones

Los resultados experimentales de molienda de maíz arrojaron que el consumo de energía varió significativamente con la malla utilizada a cada caudal de alimentación. La PSD del producto molido presentó el característico comportamiento bimodal observado en este grano por diversos autores. Resultó ser muy sensible a cambios en la apertura de la malla, y en menor medida a variaciones en el caudal de operación.

La calibración del modelo de rotura fue realizada en función de ensayos de compresión controlada y de impacto simple, junto con simulaciones de análisis de sensibilidad

y de ajuste de parámetros. La molienda en el entorno de DEM resultó ser muy sensible al módulo de Young del material y al mínimo tamaño admisible para los fragmentos.

El modelo arrojó resultados satisfactorios en cuanto a la predicción de la PSD y consumo de potencia, reflejando adecuadamente los cambios operacionales en caudal de alimentación y de apertura de la malla empleada. El modelo, ampliamente validado para materiales minerales y equipos de la industria minera, fue capaz de predecir el comportamiento del maíz en un equipo utilizado principalmente en la industria alimentaria. No fue posible predecir el comportamiento bimodal de la PSD de fragmentos, pero se logró cuantificar un margen de error aceptable en los tamaños característicos.

El trabajo futuro implica la calibración del parámetro γ de acumulación de daño según las indicaciones y recomendaciones de la bibliografía. Sabiendo que dicho parámetro es significativo en la predicción de la PSD, se espera que con su correcto ajuste se mejore la calibración del modelo y por lo tanto, la capacidad predictiva del mismo.

Declaración de intereses. Los autores no tienen intereses en competencia que declarar que sean relevantes para el contenido de este artículo.

Referencias

- [1] I. Cotabarren, M.P. Fernández, A. Di Battista, J. Piña, Modeling of maize breakage in hammer mills of different scales through a population balance approach, *Powder Technol.* 375 (2020) 433–444. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.016>.
- [2] D. Wang, H. Tian, T. Zhang, C. He, F. Liu, DEM simulation and experiment of corn grain grinding process, *Eng. Agrícola.* 41 (2021) 559–566. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n5p559-566/2021>.
- [3] M. Thomas, W.H. Hendriks, A.F.B. van der Poel, Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding, *Anim. Feed Sci. Technol.* 240 (2018) 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.03.010>.
- [4] C. Coetsee, Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles, *Powder Technol.* 364 (2020) 851–878. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.076>.
- [5] G. Hanauer de Lima, L. White, R. Bharadwaj, Particle breakage models for predicting comminution process in Rocky DEM, (2022) 1–11. <https://rocky.esss.co/library/white-paper-particle-breakage-models-for-predicting-comminution-process-in-rocky-dem/>.
- [6] A. Patwa, R.P.K. Ambrose, M.E. Casada, Discrete element method as an approach to model the wheat milling process, *Powder Technol.* 302 (2016) 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.052>.
- [7] F.P. André, L.M. Tavares, Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles, *Powder Technol.* 372 (2020) 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.016>.
- [8] B. Doroszuk, R. Król, Industry Scale Optimization: Hammer Crusher and DEM Simulations, *Minerals.* 12 (2022) 244–253. <https://doi.org/10.3390/min12020244>.
- [9] Y. Xia, J. Klinger, T. Bhattacharjee, J. Aston, M. Small, V. Thompson, *Biosystems*

- Engineering An experiment-informed discrete element modelling study of knife milling for flexural biomass feedstocks, *Biosyst. Eng.* 236 (2023) 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.10.008>.
- [10] J. Guo, G. Wang, G. Sun, S. Wang, W. Guan, Z. Chen, DEM simulation and optimization of crushing chamber shape of gyratory crusher based on Ab - t 10 model, *Miner. Eng.* 209 (2024) 108606. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108606>.
- [11] P.A.. Cundall, O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*. 29 (1979) 47–65.
- [12] C.J. Coetzee, Review: Calibration of the discrete element method, *Powder Technol.* 310 (2017) 104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>.
- [13] Ansys Inc., Rocky DEM Technical Manual, (2024).
- [14] G.K.P. Barrios, R.M. de Carvalho, A. Kwade, L.M. Tavares, Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling, *Powder Technol.* 248 (2013) 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.063>.
- [15] G.K. Barrios, N. Jiménez-Herrera, S.N. Fuentes-Torres, L.M. Tavares, DEM simulation of laboratory-scale jaw crushing of a gold-bearing ore using a particle replacement model, *Minerals*. 10 (2020) 1–16. <https://doi.org/10.3390/min10080717>.
- [16] G.K.P. Barrios, N. Jiménez-Herrera, L.M. Tavares, Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model, *Adv. Powder Technol.* 31 (2020) 2749–2758. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.011>.
- [17] L.M. Tavares, A review of advanced ball mill modelling, *KONA Powder Part. J.* 2017 (2017) 106–124. <https://doi.org/10.14356/kona.2017015>.
- [18] L.M. Tavares, R.P. King, Single-particle fracture under impact loading, *Int. J. Miner. Process.* 54 (1998) 1–28. [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(98\)00005-2](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(98)00005-2).
- [19] L.M. Tavares, R.P. King, Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics, *Powder Technol.* 123 (2002) 138–146. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00438-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00438-7).
- [20] L.M. Tavares, Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation, *Powder Technol.* 190 (2009) 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.011>.
- [21] L.M. Tavares, Review and Further Validation of a Practical Single-Particle Breakage Model, *KONA Powder Part. J.* (2022). <https://doi.org/10.14356/kona.2022012>.
- [22] L.M. Tavares, Tavares Breakage Model Description & Calibration Guidelines, (2022) 1–14.
- [23] A.J. Lynch, W.J. Whiten, S.S. Narayanan, Ball Mill Models: Their Evolution and Present Status., 20 (1986) 48–66.
- [24] A.G. Chiaravalle, I.M. Cotabarren, J. Piña, DEM breakage calibration for single particle fracture of maize kernels under a particle, *Chem. Eng. Res. Des.* 195 (2023) 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.05.015>.
- [25] R. Mugabi, K.M. Eskridge, C.L. Weller, Comparison of experimental designs used to study variables during hammer milling of corn bran, *Am. Soc. Agric. Eng.* 60 (2017) 537–544. <https://doi.org/10.13031/trans.11656>.